第30卷 第8期
2016年8月
材 料 研 究 学 报
CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH
Vol. 30 No. 8
August 2016

高径比对W纤维/Zr基非晶复合材料压缩性能的影响*

张 波[1,2] 谢博文[1] 付华萌[2] 张海峰[2]

1. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院 沈阳 110136
2. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016

摘 要 采用渗流铸造法制备W纤维/Zr基非晶复合材料, 研究高径比的变化对复合材料室温压缩力学性能的影响。结果表明, 复合材料的屈服强度随样品高径比的增大先降低, 高径比大于1时趋于平稳。高径比大于或等于1.25时, 复合材料的压缩塑性应变变化不大。高径比小于1.25时, 复合材料的压缩塑性应变均大于50%。压头与样品端部摩擦力的作用、W纤维之间非晶丝高径比的变化和W纤维与非晶基体之间变形的不匹配综合作用最终导致小高径比的复合材料样品具有更好的压缩力学性能。

关键词 金属材料, W纤维/Zr基非晶复合材料, 高径比, 屈服强度, 压缩塑性, 剪切带

分类号 TB331 文章编号 1005-3093(2016)08-0575-06

Effect of Length to Diameter Ratio on Compressive Properties of W Fiber/Zr-based Metallic Glass Composite

ZHANG Bo[1,2**] XIE Bowen[1] FU Huameng[2] ZHANG Haifeng[2]

1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang, 110136, China

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

*Supported by National Natural Science Foundation of China No.51401131.

Manuscript received March 23, 2016; in revised form April 17, 2016.

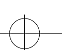
**To whom correspondence should be addressed, Tel: (024)89724198, E-mail: zhangb@alum.imr.ac.cn

ABSTRACT The W fiber/Zr-based metallic glass composite was prepared by infiltration and rapid solidification. The effect of the ratios of length to diameter of fibers on the compressive properties of the composite was investigated in detail. The results show that the yield strength firstly decreases with the increase of the length to diameter ratio then reaches a stable value when the ratio is greater than 1. The plastic strain has no obvious change when the ratio is greater than or equal to 1.25, while the plastic strain is bigger than 50% when the ratio is smaller than 1.25. The reason for these phenomena is the comprehensive effect of the friction force between pressure head and the end of the compressive sample, the change of the length to diameter ratio of the metallic glass fibers between W fibers and the mismatching between metallic glass matrix and the W fiber during deformation.

KEY WORDS metallic materials, W fiber/Zr- based metallic glass composite, aspect ratio, yield strength, compressive plasticity, shear band

非晶合金的变形和破坏机制与传统的晶态合金不同, 一直受到科研工作者的关注[1, 2]。一般来说, 非晶合金的室温塑性变形局限在很窄的剪切带内, 剪切带的快速扩展会导致样品的突然破坏[1-4]。但是, 大量研究结果表明, 无论在压缩载荷下还是拉伸载荷下, 非晶合金并不沿最大剪切应力面发生剪切断裂[4, 5]。样品尺寸和加载方式的改变也影响非晶合金的塑性变形能力, 一般情况下, 小尺寸非晶样品的塑性变形能力更好, 在压缩或者弯曲载荷下表现出一定的室温塑性变形能力[6-11]。这就带来一个问题, 剪切带的形成和扩展是如何控制非晶合金的塑性的呢? Conner等[10, 11]的研究结果发现室温下薄非

* 国家自然科学基金51401131资助项目。
2016年3月23日收到初稿; 2016年4月7日收到修改稿。
本文联系人: 张 波
DOI: 10.11901/1005.3093.2016.157



晶条带在弯曲载荷下能够经历一定的塑性变形而不破坏, 但是厚非晶合金板却会发生突然破坏。Davis 等[12]、Lewandowski 等[13]和 Lu 等的[14]研究结果表明流体静压力对 Zr 基非晶的塑性流变以及断裂行为均有一定程度的影响, 非晶合金在有限制的情况下呈现出超过10%的塑性变形能力。Bruck 等[15]研究了高径比分别为1: 2和2: 1的非晶合金样品的压缩性能, 结果表明小高径比的样品屈服强度略高且压缩塑性明显增大, 这说明非晶合金的塑性与样品的几何尺寸以及加载模式密切相关。

非晶合金在室温下塑性变形能力有限, 严重限制了非晶合金作为结构材料的应用, 因此改善非晶合金的室温塑性至关重要。而研究结果表明, 在非晶合金中引入第二相制备复合材料的方法能够有效地改善非晶合金的室温塑性[16, 17]。与纯非晶合金相比, 非晶复合材料的变形行为更加复杂, 除了受基体合金和增强相的影响外, 还与界面的结合状态以及加工过程中所产生的残余应力有关。既然非晶合金的性能与几何尺寸相关, 那么非晶复合材料的力学性能和变形过程也必然受几何尺寸的约束, 但是有关非晶合金复合材料的尺寸效应的报道还很少, 因此本文制备了不同高径比的W纤维/Zr基非晶复合材料, 详细探讨了高径比的变化对复合材料力学性能和变形行为的影响。

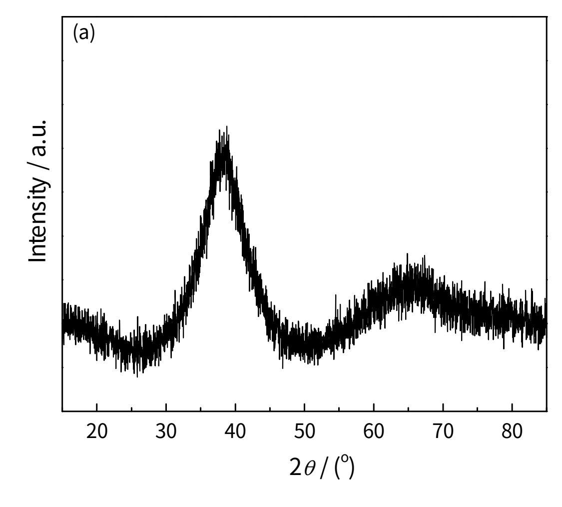
1 实验方法

$Zr_{41.2}Ti_{13.8}Ni_{10.0}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ 母合金通过电弧熔炼制备。具体过程为: 选用纯度不低于99.8%(质量分数)的Zr、Ti、Cu、Ni、Be纯金属, 各种纯金属所需的质量按原子百分比配制。经过清洗干燥后将配制好的各种金属均匀混合置于电弧炉坩埚内进行熔炼。在熔炼合金前, 先将预置于炉内的吸收钛合金锭熔化以进一步降低电弧炉炉腔内的含氧量。为保证合金锭成分尽可能均匀, 每个合金锭至少翻转熔炼四次。Zr基非晶通过铜模浇注法制备。W纤维/Zr基非晶复合材料通过熔体浸渗法制备, 所用W纤维的直径为500 μm, 制备工艺为1173 K保温4 min后, 以0.3 MPa的外压将Zr基合金熔体吹入下方的模具中。实验所用压缩样品尺寸为: 非晶合金: ϕ5×10 mm、ϕ5×7.5 mm、ϕ5×5 mm和 ϕ5×2.5 mm, 对应的高度和直径的比值(高径比)分别为2、1.5、1和0.5; W棒: ϕ2×4 mm、ϕ2×3 mm、ϕ2×2 mm和 ϕ2×1.2 mm, 对应的高径比分别为2、1.5、1和0.6; W纤维/Zr基非晶复合材料: ϕ5×10 mm、ϕ5×8.75 mm、ϕ5×7.5 mm、ϕ5×6.25 mm、ϕ5×5 mm、ϕ5×3.75 mm 和 ϕ5×2.5 mm, 对应的高径比分别为2、1.75、1.5、1.25、1、0.75和0.5; 采用日本理学D/max-2500PC 型 X 射线衍射仪(Cu- $K\alpha$ 辐射, 波长 λ = 1.54056 nm)对样品进行物相分析。采用Instron5582型万能力学试验机对样品进行压缩试验, 应变速率为 10^{-4} s^{-1}。为保证数据的可靠性, 每组样品至少做3次重复试验, 取平均值。采用FEI Quanta 600型扫描电子显微镜观察变形或断裂后样品的侧表面剪切带形貌。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的XRD衍射结果分析

图1为 $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Ni_{10.0}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ 非晶合金及W纤维/Zr基非晶复合材料压缩样品横截面的XRD谱, 由图1a可以看出, Zr基合金的XRD曲线上只有象征非晶态结构的慢散射峰, 没有其他尖锐的衍射峰出现, 说明所制备的Zr基合金为完全的非晶态。由图1b可以看出, 复合材料的XRD曲线上只有对应于增强相W的衍射峰, 无其他的衍射峰出现, 说明复合材料的基体合金仍保持非晶态结构。图1b中的插



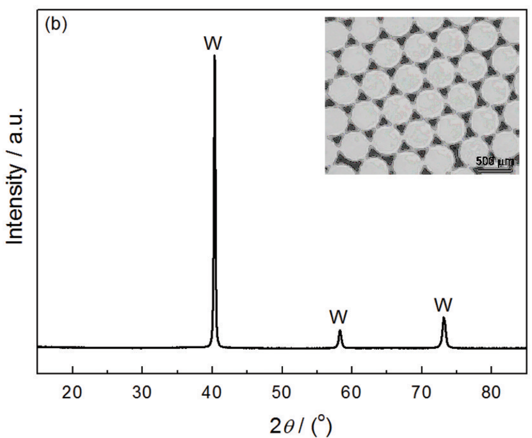


图1 Zr基非晶和W纤维/Zr基非晶复合材料的XRD衍射谱

Fig.1 The XRD patterns of the Zr-based metallic glass (a) and the W fiber/Zr-based metallic glass composite (b)

图为复合材料原始形貌的SEM照片, 由图可见, 复合材料中W纤维为近似密排分布, 体积分数约为80%, 复合材料中无明显孔洞或裂纹等宏观缺陷。

2.2 复合材料的压缩力学性能

图2为不同高径比的Zr基非晶合金、W棒以及W纤维/Zr基非晶复合材料的压缩应力应变曲线。图3为Zr基非晶合金、W棒和W纤维/Zr基非晶合金的屈服强度随样品的高径比的变化关系。可以看出Zr基非晶的屈服强度随样品高径比的增大而降低, 但高径比大于1时, 屈服强度增大的幅度降低。W棒的屈服强度随样品高径比的变化不大。W纤维/Zr基非晶复合材料的屈服强度随样品高径比的增大先降低, 高径比大于1时达到一个稳定值。由实验结果可以推断复合材料屈服强度的变化主要受非晶基体的影响。除了屈服强度外, 高径比的变化显著影响Zr基非晶和W纤维/Zr基非晶复合材料的压缩塑性, 对晶态W棒的影响不大。由图2a可以看出, 高径比为2和1.5时, Zr基非晶合金在室温下的塑性

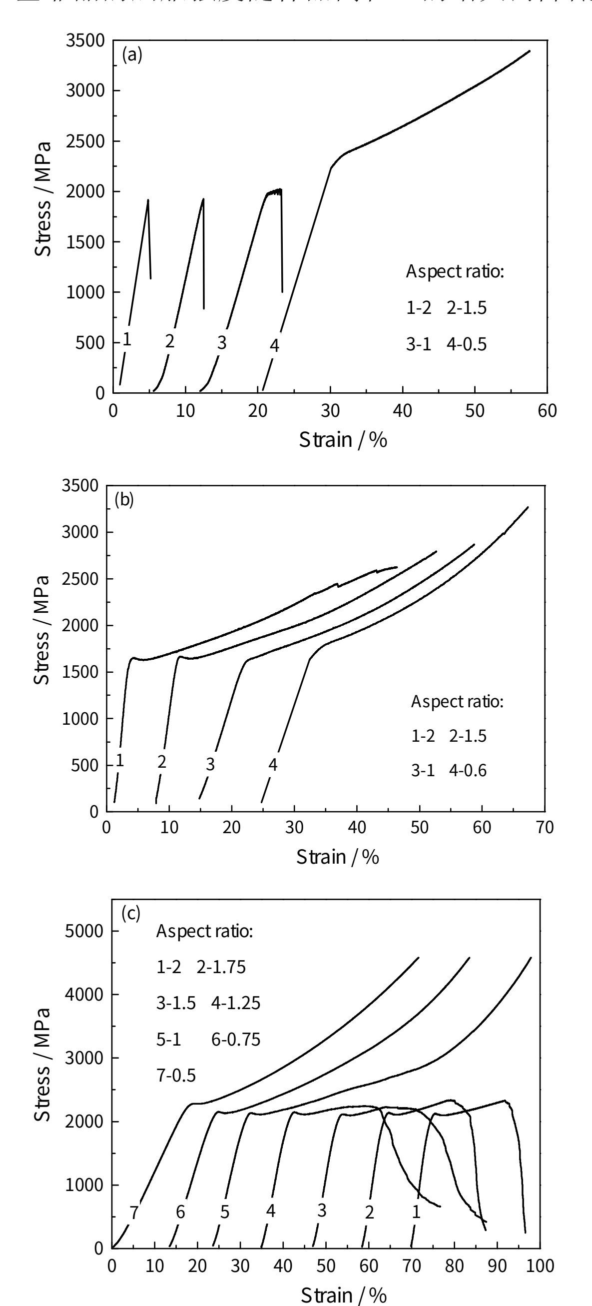
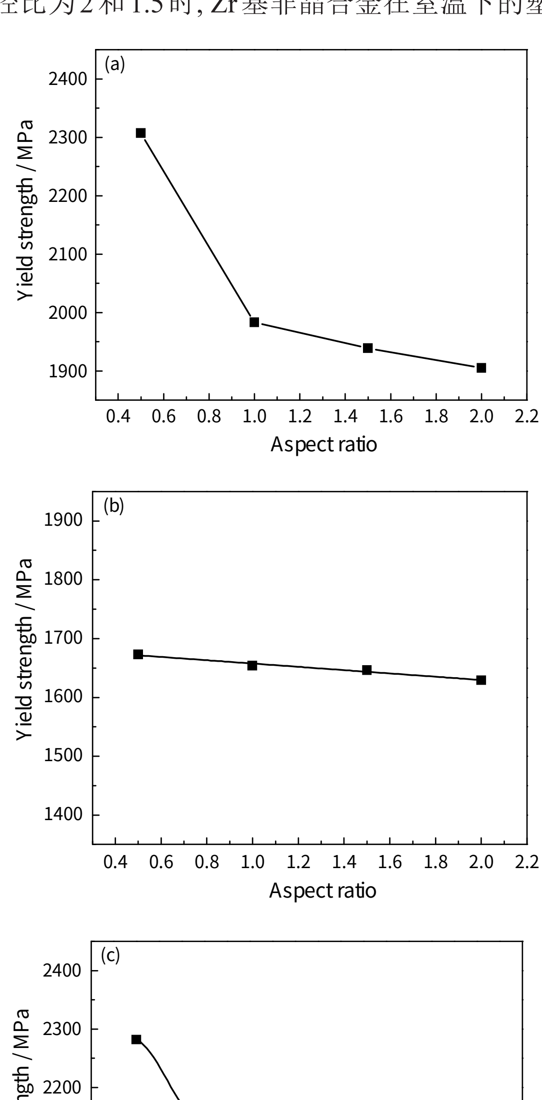


图2　不同高径比的Zr基非晶合金、W棒以及W纤维/Zr基非晶合金复合材料的压缩应力应变曲线

Fig.2 Compressive stress-strain curves of the Zr-based metallic glass (a), tungsten (b) and W fiber/Zr-based metallic glass composites (c) with different aspect ratio



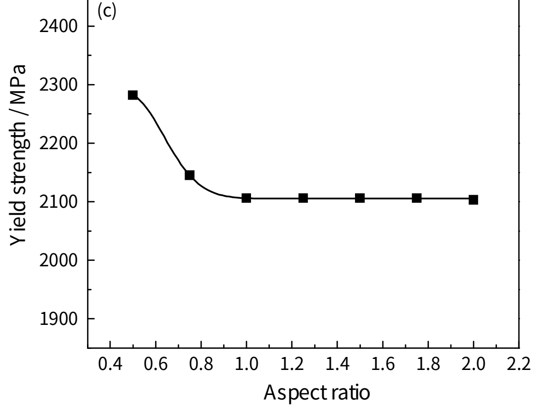
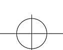


图3 压缩屈服强度随样品高径比的变化关系

Fig.3 Dependence of the Compressive yield strength on the aspect ratio. (a) Zr-based metallic glass, (b) tungsten stick and (c) W fiber/Zr-based metallic glass composites



变形能力非常有限，表现为弹性变形后突然发生的脆性断裂。但是当样品的高径比小于等于1时，Zr基非晶在压缩载荷下表现为弹塑性变形行为。高径比为0.5时，塑性应变达到了30%而样品仍然没有发生破坏，可见，高径比的改变显著影响Zr基非晶的压缩变形能力。由图2c可以看出，当样品高径比分别为2、1.75、1.5和1.25时，W纤维/Zr基非晶复合材料的压缩塑性应变分别为16%、18%、20%和20%，变化不大。但当高径比小于1.25时，复合材料的压缩塑性应变达到50%时仍然没有断裂。

2.3 复合材料变形后的侧表面剪切带和裂纹观察

Zr基非晶合金在压缩载荷下均发生剪切破坏，破坏后的侧表面形貌如图4所示，可见，随高径比的减小，样品侧表面的剪切带数量和密度明显增加，剪切带之间的交互作用明显增强。高径比为0.5时，样品侧表面出现了大量相互交错的剪切带，且大部分剪切带的方向均偏离了45°方向，样品端部靠近压头一侧尤为明显，出现了大量近似垂直于加载轴向的剪切带。由于非晶独特的结构使之不能像晶态材料一样通过位错产生塑性变形，而只能通过剪切带进行变形。而剪切带数量的多少和剪切带之间交互作用的程度往往决定着非晶材料的变形能力，剪切带数量越多、密度越大，则塑形变形能力越强；相反，剪切带数量越少、密度越小则塑形变形能力越差[11, 18]。本实验中，随着样品高径比的减小，变形后样品侧表面的剪切带数量和密度均明显增大，且剪切带的交互作用明显增强，这些现象均预示着样品的塑性变形能力也会随着高径比的减小而增强，也就是说Zr基非晶的塑性应变随高径比的减小而增大。

图5为高径比分别为2、1.5、1和0.5时，复合材料变形后的侧表面形貌图，图5a和b分别为样品断裂前的侧表面形貌，图5c和d为样品的塑性应变量分别为20%和35%时复合材料的侧表面形貌。可见，复合材料在压缩载荷下中间部分墩粗，而靠近压头部分截面直径变化较小，变形后导致样品最终失效的宏观裂纹多出现在样品中间部位的W纤维中，且裂纹多为纵向的裂纹。这是因为W纤维为拉拔加工而成，晶粒沿轴向被拉长，导致其纵向晶界强度较弱；又因为纤维为近似密排分布，多数纤维之间相互接触，导致裂纹更容易沿互相接触的W纤维进行扩展。随高径比的变化，样品中裂纹的数量和开裂程度也有区别，高径比较大时，宏观裂纹数量较少但开裂非常明显，而高径比较小时，复合材料中的宏观裂纹较多但开裂程度相对较小。压缩样品的侧表面上，不同部位的剪切带方向也有较大区别，样品中心部位剪切带大多与加载轴向成一定角度，已有一部分剪切带垂直于加载轴向。而样品端部靠近压头一侧剪切带多与加载轴向垂直，这与纯非晶侧表面观察到的剪切带方向近似。

由以上实验结果可以看出，高径比的变化显著影响Zr基非晶和W纤维/Zr基非晶复合材料的室温压缩性能。压缩实验是一种有限制的加载过程，样品的变形行为和力学性能受压头的影响作用。不同高径比的非晶合金压缩过程中剪切带扩展示意图如图6所示，由于样品端部与压头摩擦力的作用，会在样品端部产生一个由端部向中心逐渐减小的径向压缩应力，使其处于双向压应力的受力状态，而这种双向的压缩应力可以提高材料的强度并改变剪切带的方向[19]。随着高径比的减小，样品处于双向压应力作用范围的比例也会随之增大，因而更有助于样品强度和塑形的增大。假如初生剪切带与加载轴向成45°角并沿此方向进行扩展，对于高径比为2的Φ5×10 mm的样品，样品中心部位的剪切带要扩展出样品的距离为$5\sqrt{2}$ mm，样品中心部位不受压头的影响，而靠近压头一侧，剪切带的一段受压头的阻碍作用难于扩展，如图6a所示。而当高径比为0.5时，样品高度

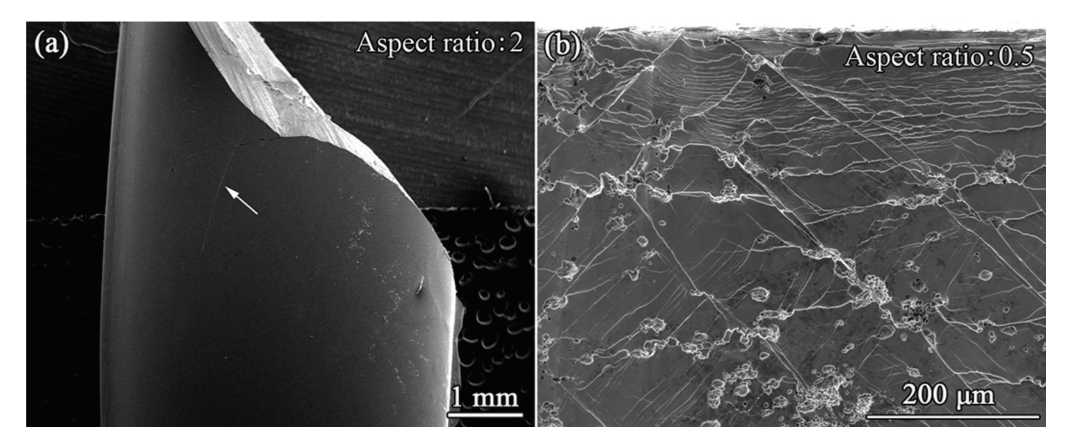


图4 Zr基非晶合金变形后侧表面的剪切带形貌

Fig.4 Shear bands and cracks on the sample profiles of the W fiber/Zr-based metallic glass composite

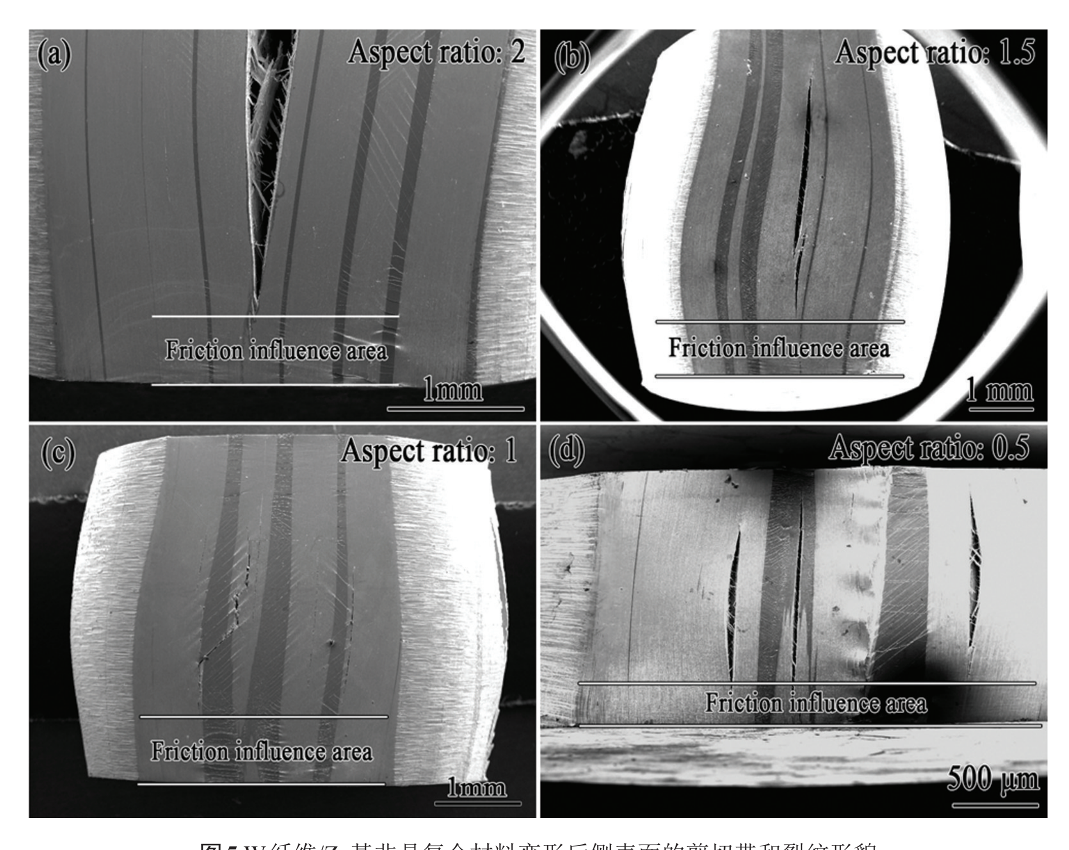


图5 W纤维/Zr基非晶复合材料变形后侧表面的剪切带和裂纹形貌

Fig.5 Shear bands and cracks on the sample profiles of the W fiber/Zr-based metallic glass composite

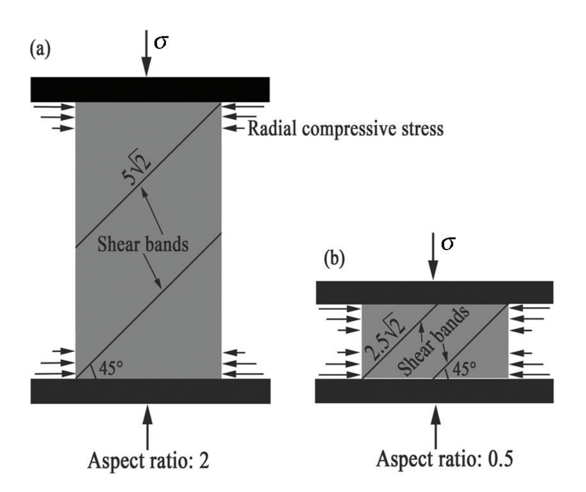


图6　不同高径比的非晶合金压缩过程中剪切带扩展示意图

Fig.6 Schematic diagram of the spreading of the shear bands in metallic glass with different aspect ratio under compressive loading

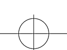
为2.5 mm, 剪切带的最大扩展距离为 $2.5\sqrt{2}$ mm, 小于 $5\sqrt{2}$ mm, 因此样品中所有剪切带的扩展都受压头的约束作用, 中心部位剪切带的两端都受压头的阻碍, 而剪切带受阻所形成的应力又会促使新的剪切带生成, 如此反复, 小高径比样品具有更好地塑性变形能力, 如图6b所示。与纯非晶相比, W纤维/Zr基非晶复合材料的变形更加复杂, 除了压头的影响因素外, W纤维也对剪切带的形成和扩展起很重要的作用。首先晶态W纤维与非晶基体变形的不匹配, 会在界面处产生应力集中, 导致剪切带优先在界面形成, 其次, 由于W纤维为近似密排分布, 因此中间的非晶三角区可看作是独立的非晶丝。随着样品高径比的减小, 非晶丝的高径比也随之减小, 因此有助于复合材料强度的提高。复合材料在压缩变形过程中, 样品横向镦粗或者纤维的屈曲失稳会产生一个横向的拉伸应力, 作用于非晶丝时可以看作是弯曲载荷, 而细小的非晶丝具有较好的弯曲塑形[10], 这有助于复合材料塑性变形能力的提高, 因此高径比的变化必然影响复合材料的压缩变形行为。

3 结　论

1. W纤维/Zr基非晶复合材料屈服强度的变化主要受非晶基体的影响, 复合材料的屈服强度随样品高径比的增大先降低, 高径比大于1时达到一个稳定值。

2. 样品高径比大于或等于1.25时, W纤维/Zr基非晶复合材料的压缩塑性应变变化不大。高径比小于1.25时, 复合材料的压缩塑性应变大于50%。

3. 压头与样品端部摩擦力的作用、W纤维之间非晶丝高径比的变化和W纤维与非晶基体之间变形的不匹配综合作用最终导致小高径比的复合材料样品显示更好的压缩力学性能。



参 考 文 献

1 W. H. Wang, The elastic properties, elastic models and elastic perspectives of metallic glasses, Progress in Materials Science, **57**(3), 487(2012)

2 M. Q. Tang, H. F. Zhang, Z. W. Zhu, H. M. Fu, A. M. Wang, H. Li, Z. Q. Hu, TiZr-base Bulk Metallic Glass with over 50 mm in Diameter, Journal of Material Science and Technology, **26**(6), 481(2010)

3 M. Q. Jiang, W. H. Wang, L. H. Dai, Prediction of shear-band thickness in metallic glasses, Scripta Materialia, **60**(11), 1004(2009)

4 Z. F. Zhang, G. He, J. Eckert, L. Schultz, Fracture mechanisms in bulk metallic glassy materials, Physical Review Letters, **91**(4), 045505(2003)

5 Z. F. Zhang, J. Eckert, L. Schultz, Difference in compressive and tensile fracture mechanisms of $Zr_{59}Cu_{20}Al_{10}Ni_8Ti_3$ bulk metallic glass, Acta Materialia, **51**(4), 1167(2003)

6 K. Zhang, P. C. Si, H. Li, Y. F. Li, Y. Y. Jiang, S. L. Zhang, X. G. Song, Plastic heterogeneity in nanoscale metallic glass, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, **44**(7-8), 1461(2012)

7 F. F. Wu, Z. F. Zhang, S. X. Mao, Size-dependent shear fracture and global tensile plasticity of metallic glasses, Acta Materialia, **57**(1), 257(2009)

8 S. Xie, E. P. George, Size-dependent plasticity and fracture of a metallic glass in compression, Intermetallics, **16**(3), 485(2008)

9 B. E. Schuster, Q. Wei, T. C. Hufnagel, K. T. Ramesh, Size-independent strength and deformation mode in compression of a Pd-based metallic glass, Acta Materialia, **56**(18), 5091(2008)

10 R. D. Conner, W. L. Johnson, N. E. Paton, W. D. Nix, Shear bands and cracking of metallic glass plates in bending, Journal of Applied Physics, **94**, 904(2003)

11 R. D. Conner, Y. Li, W. D. Nix, W. L. Johnson, Shear band spacing under bending of Zr-based metallic glass plates, Acta Materialia, **52**(8), 2429(2004)

12 L. A. Davis, Y. T. Yeow, Flow and fracture of a Ni-Fe metallic glass, Journal of Materials Science, **15**(1), 230(1980)

13 J. J. Lewandowski, P. Lowhaphandu, Effects of hydrostatic pressure on the flow and fracture of a bulk amorphous metal, Philosophical Magazine A, **82**(17-18), 3427(2002)

14 J. Lu, G. Ravichandran, W. L. Johnson, Deformation behavior of the $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ bulk metallic glass over a wide range of strain-rates and temperatures, Acta Materialia, **51**(12), 3429(2003)

15 H. A. Bruck, T. Christman, A. J. Rosakis, W. L. Johnson, Quasi-static constitutive behavior of $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ bulk amorphous alloys, Scripta Metallurgica et Materialia, **30**(4), 429(1994)

16 B. Zhang, H. Fu, Z. Zhu, A. Wang, H. Li, C. Dong, Z. Hu, H. Zhang, Synthesis and properties of tungsten balls/Zr-base metallic glass composite, Materials Science and Engineering: A, **540**, 207(2012)

17 H. F. Zhang, H. Li, A. M. Wang, H. M. Fu, B. Z. Ding, Z. Q. Hu, Synthesis and characteristics of 80 vol.% tungsten (W) fibre/Zr based metallic glass composite, Intermetallics, **17**, 1070(2009)

18 J. Schroers, W. L. Johnson, Ductile Bulk Metallic Glass, Physical Review Letters, **93**(25), 255506(2004)

19 Z. Zhang, G. He, H. Zhang, J. Eckert, Rotation mechanism of shear fracture induced by high plasticity in Ti-based nano-structured composites containing ductile dendrites, Scripta Materialia, **52**(9), 945(2005)

